

张定媛,田晓阳,贾朋群,2018. 热带气旋预报性能及指标综合评述[J]. 气象,44(12):1628-1634.

热带气旋预报性能及指标综合评述^{*}

张定媛 田晓阳 贾朋群

中国气象局气象干部培训学院,北京 100081

提 要: 热带气旋(TC)位居全球十大自然灾害之首,受到世界范围内的广泛重视。为了解当前国际上 TC 预报的整体水平,更好地审视我国 TC 预报的进展及在国际上的位置,基于主要国家和国际机构的 TC 预报性能评估项目,本文对近年来各预报中心的 TC 业务预报水平进行了客观对比分析。结果表明,过去十几年来,我国的 TC 路径预报水平有大幅度提高,已经跻身世界先进行列。各国对 TC 强度预报性能的提升预计还会经历一个漫长的过程,未来台风风雨预报的评估发展值得期待。

关键词: 热带气旋,路径预报,强度预报,验证

中图分类号: P457.8

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2018.12.013

Review on Performance and Index of Tropical Cyclone Forecast

ZHANG Dingyuan TIAN Xiaoyang JIA Pengqun

China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

Abstract: In order to understand the level of tropical cyclone (TC) forecast in the world and the status of typhoon forecast in China, based on the TC forecast assessments of the major TC forecast services in the world, the main indicators of TC forecast and the comparisons of different forecast centers are reviewed. The results show that, in the past decades, typhoon track forecast of China has greatly improved, already ranked among the world's top level. The improvement of TC intensity forecast has a long way to go. The assessment and development of typhoon precipitation forecast are worth expecting.

Key words: tropical cyclone (TC), track forecast, intensity forecast, verification

引 言

热带气旋(tropical cyclone, TC)是亚洲及太平洋区域最主要的灾害性天气系统,造成严重灾害的 TC 几乎每年都有发生。1968 年,联合国亚太经社会(ESCAP)和世界气象组织(WMO)共同设立了政府间合作组织——台风委员会(ESCAP/WMO Typhoon Committee),旨在通过气象、水文、防灾减灾等努力,减少台风灾害给亚洲太平洋地区造成的损失。目前台风委员会有 14 个会员国,中国是其创始

会员之一,台风委员会秘书处现设于中国澳门。在台风委员会最新的“战略规划(2017—2021)”中明确的目标仍然是降低会员国因 TC 而造成的人员死亡和直接经济损失,并确定了实现目标的五个优先关键领域,其中之一便是利用基于影响的预测和基于风险的预警,来提高 TC 预报准确性和及时性等能力(ESCAP/WMO,2017)。

TC 造成的灾情主要发生在登陆前后,且随着沿海地区的经济规模和人口的增长而增加。但准确预测 TC 的登陆时间、地点和影响风险等,仍然还是一个持续的挑战(Leroux et al, 2018)。2017 年,西

^{*} 科技部改革发展专项“巴黎会议后应对气候变化紧迫重大问题研究”和中国清洁发展机制基金(2013024)共同资助

2018 年 6 月 19 日收稿; 2018 年 10 月 10 日收修定稿

第一作者:张定媛,主要从事气象科技信息研究. Email:zhangdy@cma.gov.cn

北太平洋上共生成 27 个台风,8 个在中国登陆,其中第 13 号台风天鸽在珠江口登陆时中心风力达 $48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,由于其登陆地点为人口密集的城市群,且伴随有较强的风暴潮影响,导致的经济损失较为严重(王靖等,2018)。在菲律宾登陆的第 27 号台风天秤,则是 2017 年度导致伤亡情况最严重的台风。

对预报结果的误差分析,有助于改进预报方案从而提高预报准确率。世界各主要预报机构大都会对其 TC 预报的误差进行分析,我国也有不少关于 TC 预报误差分析的研究工作(杨兆礼等,2014;尹姗和任宏昌,2018),其中上海台风研究所受中国气象局(CMA)的委托,自 20 世纪 80—90 年代起对我国的 TC 预报技术方案进行性能评估,并作为业务准入的主要依据(陈国民等,2018)。为了深入地了解当今国际 TC 预报的整体发展水平,客观审视中国 TC 预报的发展状况及其在国际上的位置,本文基于世界各主要预报机构开展的 TC 预报性能评估工作,对当今 TC 业务预报的总体性能进行了客观综合对比分析。

1 热带气旋预报验证和比较项目

1.1 全球——WGNE 数值天气预报业务模式 TC 预报比较

世界气候研究计划联合科学委员会和 WMO 大气科学委员会共同建立了数值试验工作组(WGNE),负责促进用于天气、气候、水和环境所有时间尺度预测的大气环流模式的发展,并进行诊断和解决不足。1991 年,日本气象厅(JMA)对 JMA、欧洲中期天气预报中心(ECMWF)和英国气象局(UKMO)三家全球数值天气预报业务模式 TC 路径预报结果进行了验证并在次年的第八届 WGNE 会议上首次报告了验证结果。自此,每届 WGNE 会议上 JMA 都会提交最新的验证比较报告。2004 年,CMA 与法国气象局同期加入了该比较项目(表 1)。截至 2016 年,共有 12 个全球模式参与了比对,验证区域也从第一次验证的西北太平洋区域扩大到覆盖全球范围。

2016 年,正值 WGNE TC 预报比较项目 25 周年之际,JMA 对西北太平洋、北大西洋、东北太平洋(含中央太平洋)、北印度洋、澳大利亚和南印度洋等全球六个区域的历年 TC 预报比较验证进行了总结

回顾(Yamaguchi et al,2017)。西北太平洋区域是该项目最初开始检验的区域,也是全球年平均 TC 数量最多的地区,预报关注度最高。其次为东北太平洋和北大西洋区域,北印度洋区域的 TC 数量最少。验证参考的是各个区域专业气象中心和热带气旋预警中心报告的最佳路径和强度。需要指出的是,由于样本的非均一性,对特定年份或特定区域的模式预报结果比较是存在一定局限性的。截至 2014 年,各个 TC 验证区域 3 d 预报位置误差的趋势显示,除北印度洋区域因数据量太少外,其余区域的预报误差均呈现出下降的趋势,其他的预报时效结果亦是如此。以 ECMWF 的全球数值天气预报系统为例,在西北太平洋区域,2012—2014 年的三年平均 5 d 预报位置误差为 385 km,而 1991—1993 年的 2、3 d 预报误差分别为 331、435 km,表明在这 22 年间 TC 路径确定性预报时效大约提前了 2.5 d。WGNE 的报告还指出,虽然路径预报的平均误差在减小,但仍有许多误差非常大的情况存在,通过减少这种大误差出现的数量,则有可能进一步减少 TC 预报的年平均位置误差。

表 1 参与 WGNE TC 路径预报比较的数值天气预报机构

Table 1 Numerical weather prediction centers participating in the WGNE intercomparison

中文名	英文缩写	加入年份
日本气象厅	JMA	1991
欧洲中期天气预报中心	ECMWF	1991
英国气象局	UKMO	1991
加拿大气象中心	CMC	1994
德国气象局	DWD	2000
美国国家环境预报中心	NCEP	2003
澳大利亚气象局	BoM	2003
中国气象局	CMA	2004
法国气象局	FRA	2004
美国海军研究实验室	NRL	2006
巴西天气预报与气候研究中心	CPTEC	2006
韩国气象厅	KMA	2010

不同于 TC 路径预报准确性总体上的稳步提升,TC 强度预报准确性的提高仍是一个巨大的挑战。WGNE 比较项目验证了西北太平洋和北大西洋 2012—2014 年 TC 中心气压的 3 d 预报。结果显示,当 TC 实际中心气压在 940 hPa 或更低时,各机构数值预报模式都倾向于低估 TC 的强度。即使在预报初始阶段,TC 强度也强烈地被低估。麻素红和陈德辉(2018)对 CMA 区域模式、ECMWF 和

NCEP 全球模式的性能验证结果也显示了在 TC 强度预报上存在明显负偏差。这表明数据同化和预报中使用的模式分辨率还需进一步提高,同时还需要改进数据同化技术以及提高 TC 内部和外围观测数据的数量和质量。

1.2 西北太平洋——WMO 登陆台风预报示范项目(WMO-TLFDP)

2009 年 10 月,中国气象局华东区域气象中心向 WMO 提议设立“登陆台风预报示范项目(WMO-TLFDP)”。2010 年 5 月,该项目在 2010 年上海世博会期间启动,中国气象局上海台风研究所为项目牵头机构之一。WMO-TLFDP 旨在增强分析和认识登陆台风预报可信度的能力,推进先进的登陆台风预报技术在 WMO 成员的业务转化和应用。研制和集成台风预报评估技术,并对登陆台风预报进行综合分析评估,是该项目的主要任务之一(雷小途和余晖,2015)。

在项目第一阶段(2010—2012 年)和第二阶段(2013—2015 年),WMO-TLFDP 从 15 家台风预报产品提供机构(表 2)收集实时 TC 预报产品,包括确定性台风路径和强度预报、路径和强度的集合预报、确定性大风半径预报、大风概率预报和格点模式输出。产品通过项目网站(<http://tlfdp.typhoon.gov.cn/>)和上海台风预警中心的业务网站进行传

播。在第三阶段(2016—2018 年)中,项目将继续努力展示和评估新开发的 TC 预报技术,制定和记录 TC 预报验证的高级指南,并特别关注 TC 强度和降水。

TLFDP 在 TC 预报验证方面取得了重大进展,包括建立了实时和季节后 TC 预报验证工具,开发和整合了几项新的验证技术,对西北太平洋地区 TC 预报验证的业务状态进行了调查,并为 WMO 文件“热带气旋预报验证”做出贡献。自 2010 年以来,该项目对业务预报机构和确定性数值预报模式的 TC 路径、强度和降水进行评估,以揭示当前的 TC 预报指南对西北太平洋区域的预报能力,还提出了基于集合预报系统(EPS)产品或多重确定性数值预报模式产品的新 TC 路径和强度预报共识方法。

1.2.1 TC 路径预报误差

自 2013 年起,由中国气象局上海台风研究所负责,TLFDP 每年向 ESCAP / WMO 台风委员会提交针对西北太平洋区域的季后预报验证报告。本文基于台风委员会第 50 次会议上海台风研究所发布的《2017 年热带气旋业务预报验证》报告(以下简称验证报告)(Chen et al,2018),对西北太平洋区域的 TC 路径及强度预报水平和指标进行分析。该验证选择的最佳路径数据集为日本东京台风中心的资料。

台风官方预报机构发布的通常为主观确定性预报。参与主观预报验证的五家机构为 CMA、HKO、JMA、JTWC、KMA。验证报告显示,2017 年五家官方预报机构的平均预报误差在 24、48、72、96 h 预报时效上十分接近,分别为 85、140、220、320 km 左右。120 h 预报上差距相对较大,最小为 347.2 km (HKO),最大达 423.0 km(CMA)。官方预报中,CMA 的 24 h 预报误差最小,为 80.3 km,略高于 2016 年 HKO 的最小误差 72.5 km(Chen et al,2017)。

近十年各官方机构台风路径预报水平总体上呈提升趋势,除 24 h 预报外,绝大部分机构 48、72 h 预报的路径误差均较 2016 年有所减小。在五家官方机构中,CMA 24 h 台风预报也从十年前的最末水平跃升至 2017 年的最佳。值得注意的是,由于观测资料不足和估算 TC 位置和强度的技术不同,不同数据集中 TC 的位置、强度和结构信息通常有所不同。因此,使用不同的最佳路径数据集进行验证,可能会导致 TC 预报表现的差异。根据 Chen et al

表 2 台风预报产品的提供机构(Lei et al,2016)

Table 2 Typhoon forecast products providers
(Lei et al,2016)

	中文名	英文缩写
1	欧洲中期天气预报中心	ECMWF
2	中国香港天文台	HKO
3	中国气象局热带海洋气象研究所	ITMM
4	日本气象厅	JMA
5	美国联合台风预警中心	JTWC
6	韩国气象厅	KMA
7	加拿大气象局	MSC
8	美国国家环境预报中心	NCEP
9	美国国家飓风中心	NHC
10	中国气象局国家气象中心	NMC/CMA
11	中国气象局华东区域气象中心	ECRMC
12	世界气象组织区域专业气象中心(RSMC)——东京台风中心	RSMC Tokyo
13	中国气象局上海台风研究所	STI
14	澳大利亚气象局	BoM
15	美国国家大气研究中心 热带气旋指导项目	TCGP

(2018)的研究,以不同的观测数据作为参考,存在 5%~10%的路径误差偏差。

参与客观预报验证的六个全球模式为 CMA T639、ECMWF-IFS、JMA-GSM、NCEP-GFS、KMA-GDAPS、UKMO-MetUM,六个区域模式为 BoM-ACCESS-TC、GRAPES-TCM、GRAPES-TYM、CMA-TRAMS、HWRF、SHANGHAI-TCM。关于客观确定性预报,在 12 个全球及区域模式数值预报方法的比较中,CMA 区域模式 CMA-TRAMS 在 24 h 预报时效表现最佳,误差为 64.9 km,但其样本数量最小。48、72、96、120 h 预报表现最佳模式分别为 ECMWF-IFS(108.9 km)、UKMO-MetUM(183.9 km)、NCEP-GFS(264.6 km)和 ECMWF-IFS(323.0 km)。全球模式和区域模式 24、48、72 h 的 TC 路径预报误差趋势显示,客观模式路径预报的水平比较参差不齐,但误差总体仍呈下降趋势。欧洲中心全球模式 ECMWF-IFS 总体来说在历年各个预报时效中表现最优,其次为美国全球模式 NCEP-GFS。中国气象局区域模式 CMA-TRAMS 的预报表现正在逐年向顶尖全球模式靠近,2017 年 CMA-TRAMS 的 24 h 路径预报误差在参与比较的模式中最小,长时效预报的误差也在缩小。

加强集合预报的使用对 TC 路径预报十分重要。参与集合预报验证的六个系统为 ECMWF-EPS、JMA-TEPS、JMA-WEPS、MSC-CENS、NCEP-GEFS 和 UKMO-EPS。验证报告中,2017 年 6 个 EPS 的集合平均路径误差比较显示,在 72 h 以内预报时效中,ECMWF-EPS 为最佳集合预报系统,其 24 h 预报误差仅为 48.6 km,远低于主、客观预报误差。大于 72 h 预报时效时,NCEP-GFS 表现最佳,其 120 h 预报误差小于 380 km。而在 2016 年的评估中,ECMWF-EPS 在所有时效预报中均误差最小(Chen et al, 2017),ECMWF 集合预报对路径的预测能力在逐年提高(杨国杰等,2018)。2017 年各集合预报系统的 1、3、5 d 路径预报误差分别在 100、200、400 km 左右。

1.2.2 TC 强度预报误差

根据验证报告,2017 年各个预报时效主、客观预报方法最大风速预报的平均绝对误差比较显示,HKO 在 24、48 h 强度预报误差最小,分别为 4.91、6.94 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$;72 h 强度预报绝对平均误差最小的是 JMA(7.39 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);96、120 h 预报误差最小的

是 KMA,分别为 7.53、8.19 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。与 2016 年一样(Chen et al,2017),2017 年全球和区域模式的强度预报误差仍然高于官方预报,由此可见,在 TC 强度预报中,离不开预报员的个人经验及其对预报技术的理解运用,预报员主观判断的加入能更好地提升预报的准确度。参照不同的 TC 最佳路径强度或实时强度,官方预报强度验证结果可能存在 15%~25%的差异,而全球模式与区域模式误差区间更广。这表明与 TC 位置相比,最佳路径或实时记录中观测到的 TC 强度的差异更大(Chen et al,2018)。

2 中国台风业务预报

目前,在西北太平洋海域有中国大陆、中国香港、台湾地区、日本、美国、韩国和欧洲等所属多家机构开展多要素的台风业务预报工作。例如:中国香港天文台自 19 世纪 80 年代建站以来,就开始了对热带气旋的警告信号发布,目前其负责对西北太平洋和南海出现的热带气旋进行预报、警告和资料收集汇编。日本东京台风中心是 WMO 的区域专业气象中心,于 1989 年 7 月在日本气象厅总部成立,在世界天气监测网项目下开展西北太平洋热带气旋的分析和预报工作。美国联合台风警报中心是由美国海军和空军的组成的特别部队,其起源可追溯到 1945 年 9 月的关岛舰队气象/台风追踪中心。目前该中心位于夏威夷珍珠港,负责为美国国防部发布西北太平洋、南太平洋和印度洋区域的热带气旋警告。

中国已经建立了以气象卫星、多普勒天气雷达、探空气球、地面自动观测站、海上浮标等为基础的台风海-陆-气一体化协同观测系统,能够对台风开展全方位的实时监测,为台风业务和科研提供第一手资料。中国气象局建立了亚太地区台风多源资料数据库,与 WMO 东京台风中心、香港天文台和美国海军的联合台风警报中心四家机构一起,在西北太平洋区域开展台风最佳路径资料的整编和共享(Ying et al,2014),为国内外开展西北太平洋台风实时预报业务、气候变化和极端台风事件研究提供了重要的数据支持。

近 30 年来,随着气象观测技术的发展、计算机性能的提高以及数值预报模式的改进和升级,尤其是资料同化技术的发展应用等,台风预报业务不断发展进步(Yamaguchi et al,2015;Peng et al,2017)。台风预

报时效延长,预报准确率和精细化程度提高,预报指导产品也更为丰富。

在过去的几十年中,中国的台风路径预报准确率在不断提高。台风路径预报已由半经验、半理论的定性预报方法,发展到以数值预报为基础,以人机交互处理系统为平台,综合应用多种资料和方法的预报技术路线。这些预报方法包括动力统计预报、动力释用预报、神经网络方法、多模式集成预报、(单一模式)集合预报、(多模式)超级集合预报等(钱传海等,2012)。如图 1 所示,自 1985 年以来,中国气象局 24~120 h 各时效台风路径预报准确率都取得明显进步,其中 2015 年各时效台风路径预报准确率均创历史新高。24 h 台风路径预报误差在过去三十多年中减少了约 70%,并且 2015—2016 年连续两年稳定在 70 km 以内(黄彬等,2018)。

不同于台风路径预报水平的大幅提升,台风强度预报的进展尚不明显。对台风强度预报结果的检验分析主要是针对台风中心附近最大风力(最低气压)的预报误差。张守峰等(2015)利用历年中央气象台的综合预报资料,对实时台风强度误差进行了检验分析。图 2 显示的是 2001—2012 年逐年中央气象台台风强度预报误差,可以看出,这十余年间台风强度的预报水平并没有明显改善,预报误差随时间逐年波动,无明显趋势,预报强度(风速和气压)偏强几率较大。

3 美国飓风预报

WMO 的最新报告指出,2017 年剧烈天气和气

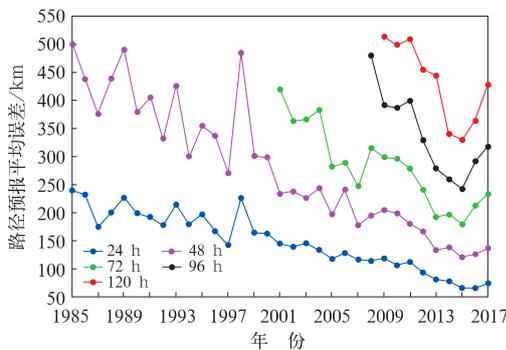


图 1 1985—2017 年中国气象局台风路径业务预报误差 (中国气象局,2018)

Fig. 1 Typhoon track errors of CMA forecast from 1985 to 2017 (中国气象局, 2018)

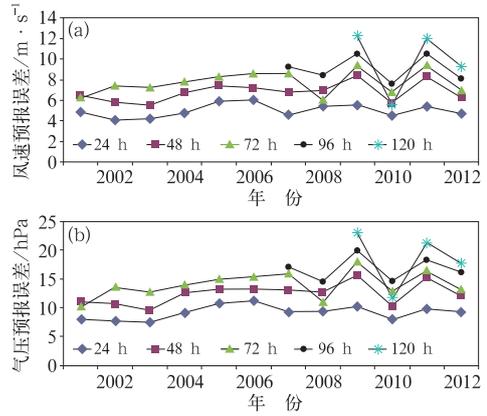


图 2 2001—2012 年(a)风速预报绝对误差演变和(b)中心气压预报绝对误差演变 (张守峰等,2015)

Fig. 2 Annual mean absolute forecast errors of wind velocity (a) and annual mean absolute forecast errors of surface pressure (b) from 2001 to 2012 (张守峰等,2015)

候事件造成的损失到达 3200 亿美元,其中仅美国的 3 个飓风 Harvey、Irma 和 Maria 造成的损失就高达约 2650 亿美元(WMO,2018)。面对自然环境灾害时,社会的脆弱性日益增加,在此背景下,美国国家天气局(NWS)进行了改革并以把美国建设成“时刻准备、有求必应、灵活应变”的“做好应对气象灾害准备”的国家作为未来的发展愿景。

NWS 的报告显示(Uccellini, 2017),过去 25 年,美国 TC 预报有了很大改进。1992 年,飓风 Andrew 之前,全球模式还尚未用于官方预报,全球预报系统捕捉到了飓风的“L”形路径,在这之后全球模式开始应用于官方预报。2005 年的飓风 Katrina 期间,5 d 时效的预报中,数值模式的应用加强,模式能够捕捉到飓风的强度和路径,但是具有很大的不确定性,强度变化预报时效可提前到 1~2 d。2017 年飓风 Irma 登陆前,热带低压还未在大西洋上形成时,模式提前 10 d 捕捉到了飓风 Irma 对美国东南部构成威胁。模式预估的路径向右急转向北,虽然具体登陆点不确定,但可信度也足够提前 6 d 对美国东南部佛罗里达州发出预警,最终模式结果也得到了证实。

根据报告,在飓风 Harvey 登陆之前,NCEP-GFS、ECMWF 和 HWRF 模式的复合路径预报都

显示出了不同程度的西南向偏差,飓风登陆前模式虽然捕捉到了飓风强度快速增强,但还是低于最终实际等级 4 级。美国、欧洲和英国三家模式对飓风 Irma 的路径预报误差比较中,36 h 以内三个模式误差相差不大,大约在 40 km 左右。36 h 以上预报时效,ECMWF 模式显现出了绝对的优势,其中 7 d 预报误差比美国和英国模式小约 150 km。而在飓风 Maria 路径预报中,36 h 以内 ECMWF 模式性能表现最佳,误差稳定在 40 km 以内。48、72、96 h 预报 NCEP-GFS 模式表现均优于其他模式预报,路径误差分别约为 40、50、80 km。2017 年的三个飓风预报案例还显示,美国模式的飓风 3 d 路径预报性能表现良好,对发布 5 d 甚至更长期飓风路径预报的自信和精确度也在增强,但飓风强度变化的预报仍然是一个挑战。

4 结论与讨论

综上所述,无论是 TC 路径的官方预报还是客观模式的预报,在过去十几年间都有了明显的改善,且模式的客观预报水平甚至优于官方主观预报水平。在西北太平洋区域,路径预报时效获得了 2.5 d 的提升。中国的台风路径预报水平也有了大踏步的前进,2015—2016 年连续两年路径误差稳定在 70 km 以内。2017 年,在 24 h 预报台风路径官方预报和客观模式预报的验证中,中国均位列第一。中国的台风路径预报能力已经跻身世界先进行列。

TC 强度预报仍然是当今大气科学研究和业务预报的重点、难点问题(杨璐等,2017),强度预报技巧的提高远远低于路径预报(DeMaria et al,2014; Emanuel and Zhang,2016; Tallapragada et al,2016)。在 TC 强度预报中,官方主观预报误差要小于模式预报误差,表明预报员在强度预报中所发挥的主观能动性仍是不可或缺的。但由于影响 TC 强度的因素错综复杂,缺乏对海洋与大气界面精细物理过程的科学认知(Zhao et al,2017),各国 TC 强度预报在过去很长时间内几乎没有太大进步,预报性能的提升预计还会经历一个漫长的过程。

本文给出了公开报告或文献中记录的 WMO 和 WCRP 指导下的 TC 预报验证项目所关注的预报验证指标,目前预报评估工作关注的重点主要是 TC 路径和强度的确定性预报,概率预报的评估产品不多,台风降水、风和风暴潮预报等指标的验证尚

未受到足够的重视。此外,由于验证指标误差与最佳路径数据集资料高度相关,需要加强对台风的实时监测,获取更多观测资料,改进估算技术,努力提高数据集的“真实性”。在业务第一线,预报员层面也有关侧重点,基于 WMO-TLFD 调查(Yu,2016),预报员认为台风预报中最难的也是最为关注的指标是登陆点、强度变化和风雨覆盖范围。其他精细化水平预报指标如风雨强度、持续时间、台风初始强度、尺度、移速、环境气压、环境风切变、洋面温度等或可纳入考量的范围。与 TC 有关的灾害是由破坏性大风、暴雨和风暴潮等造成的,这些影响很大程度上取决于 TC 的路径,未来可以通过路径预测的提升来探索和评估基于影响的 TC 相关预警(Yamaguchi et al,2017)。

致谢:特别致谢上海市气象局雷小途研究员对本文撰写提出的指导意见和建议,感谢登陆台风预报示范项目(WMO-TLFD)提供数据支持。

参考文献

- 陈国民,张喜平,白莉娜,等,2018. 2016 年西北太平洋和南海热带气旋预报精度评定[J]. 气象,44(4):582-589.
- 黄彬,郝静,刘淑乔,2018-03-01(3). 预报准确率迈入国际先进行列——我国台风预报技术与科研进展纵览[N]. 中国气象报.
- 雷小途,余晖,2015. WMO 登陆台风预报示范项目研究进展[J]. 气象科技进展,5(2):18-23.
- 麻素红,陈德辉,2018. 国家气象中心区域台风模式预报性能分析[J]. 热带气象学报,34(4):451-459.
- 钱传海,端义宏,麻素红,等,2012. 我国台风业务现状及其关键技术[J]. 气象科技进展,2(5):36-43.
- 王靖,钱传海,张玲,2018. 2017 年西北太平洋和南海台风活动概述[J]. 海洋气象学报,38(2):1-11.
- 杨国杰,沙天阳,程正泉,2018. 2009—2015 年 ECMWF 热带气旋集合预报的检验及分析[J]. 气象,44(2):277-283.
- 杨璐,费建芳,黄小刚,等,2017. 西北太平洋环境风垂直切变和热带气旋移动对涡旋内对流非对称分布影响的特征分析[J]. 气象学报,75(6):943-954.
- 杨兆礼,陈子通,张诚忠,等,2014. 2012 年中国南海台风模式预报情况[J]. 热带气象学报,30(2):392-400.
- 尹姗,任宏昌,2018. 2017 年 9—11 月 T639、ECMWF 及日本模式中后期预报性能检验[J]. 气象,44(2):326-333.
- 张守峰,余晖,向纯怡,2015. 中央气象台台风强度综合预报误差分析[J]. 气象,41(10):1278-1285.
- 中国气象局,2018. 风雨兼程 50 年[R]. 北京:中国气象局.
- Chen Guomin, Lei Xiaotu, Zhang Xiping, et al, 2018. Verification of tropical cyclone operational forecast in 2017[C]//Proceedings of the 50th Session ESCAP/WMO Typhoon Committee. Hanoi, Vietnam: ESCAP/WMO Typhoon Committee.
- Chen Guomin, Zhang Xiping, Chen Peiyan, et al, 2017. Performance

- of tropical cyclone forecast in western north pacific in 2016[J]. Trop Cycl Res Rev, 6(1-2):13-25.
- DeMaria M, Sampson C R, Knaff J A, et al, 2014. Is tropical cyclone intensity guidance improving? [J]. Bull Amer Meteor Soc, 95(3):387-398.
- Emanuel K, Zhang Fuqiang, 2016. On the predictability and error sources of tropical cyclone intensity forecasts[J]. J Atmos Sci, 73(9):3739-3747.
- ESCAP/WMO, 2017. Typhoon committee strategic plan 2017—2012 [R]. Macao, China; ESCAP/WMO.
- Lei Xiaotu, Yu Hui, Chen Guomin, et al, 2016. WMO typhoon landfall forecast demonstration project (WMO-TLFDP) progress and future plans[J]. Trop Cycl Res Rev, 5(3-4):72-84.
- Leroux M D, Wood K, Elsberry R L, et al, 2018. Recent advances in research and forecasting of tropical cyclone track, intensity, and structure at landfall[J]. Trop Cycl Res Rev, 7(2):85-105.
- Peng Xudong, Fei Jianfang, Huang Xiaogang, et al, 2017. Evaluation and error analysis of official forecasts of tropical cyclones during 2005—14 over the western North Pacific. Part I: storm tracks [J]. Wea Forecasting, 32(2):689-712.
- Tallapragada V, Kieu C, Trahan S, et al, 2016. Forecasting tropical cyclones in the western North Pacific basin using the NCEP operational HWRF model: model upgrades and evaluation of real-time performance in 2013[J]. Wea Forecasting, 31(3):877-894.
- Uccellini L W, 2017. National weather service progress in building a weather ready nation[R].
- WMO, 2018. WMO statement on the state of the global climate in 2017[R]. Geneva, Switzerland; World Meteorological Organization.
- Yamaguchi M, Ishida J, Sato H, et al, 2017. WGNE intercomparison of tropical cyclone forecasts by operational NWP models: a quarter century and beyond[J]. Bull Amer Meteor Soc, 98(11):2337-2349.
- Yamaguchi M, Vitart F, Lang S T K, et al, 2015. Global distribution of the skill of tropical cyclone activity forecasts on short- to medium-range time scales[J]. Wea Forecasting, 30(6):1695-1709.
- Ying Ming, Zhang Wei, Yu Hui, et al, 2014. An overview of the china meteorological administration tropical cyclone database [J]. J Atmos Oceanic Technol, 31(2):287-301.
- Yu Hui, 2016. WMO typhoon landfall forecast demonstration project (TLFDP) — progress report[R]. Shanghai: Shanghai Typhoon Institute/CMA.
- Zhao Biao, Qiao Fangli, Cavaleri L, et al, 2017. Sensitivity of typhoon modeling to surface waves and rainfall[J]. J Geophys Res, 122(3):1702-1723.